

УДК 621.891

## ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ МАГНИТОПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКОВ

*А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо, В.В. Новиков, О.О. Новикова*

Магнитопассивные подшипники находят все более широкое распространение в современной технике. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с магнитоактивными подшипниками: большую грузоподъемность, простоту конструкции, а также широкие возможности при комбинировании их с магнитоожидкостными подшипниками [1, 2, 3, 4]. Магнитопассивные подшипники наиболее эффективны как направляющие металлорежущих станков, узлы трения шпиндельного оборудования, а также как трибосопряжения, где невозможна систематическая смазка взаимодействующих поверхностей [3, 4, 5].

Для практического применения магнитных подшипников необходимо иметь методику расчета оптимальной магнитной системы, например, по критерию минимальных затрат дорогостоящего магнитоожидкостного материала. Для этого вначале были рассчитаны силы магнитостатического взаимодействия между двумя осесимметричными постоянными магнитами, зная которые определяется грузоподъемность и жесткость подшипника.

Для упрощения поиска оптимальных размеров подшипников, построения их математических моделей, обобщения экспериментальных данных по работе подшипников в различных условиях, например, при повышенных температурах, необходимо определить условия подобия магнитосиловых свойств магнитных систем подшипников [1, 2, 3].

В работе [3] были получены уравнения, выражающие силовые взаимодействия различных магнитов в подшипниках. Для определения критериев подобия нужно привести эти уравнения к безразмерному виду. Покажем это на примере расчета взаимодействия двух цилиндрических магнитов, однородно намагниченных вдоль оси и расположенных несоосно, так что верхний магнит сдвинут на расстояние  $C$  от оси, проходящей через центр второго магнита (рис.). Сила нормального  $F_z$  и радиального  $F_\rho$  магнитостатического взаимодействия в этом случае определяется соотношениями:

$$F_z = \frac{\mu_0 J_1 J_2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-H_2}^0 \int_L^{L+H_1} \frac{R_1 (R_1 - C \cos \varphi) (z_1 - z_2)}{\rho^2 [(R_2 + \rho)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{3/2}} \times \left[ -E + \frac{R_2^2 + \rho^2 + (z_1 - z_2)^2}{(R_2 - \rho)^2 + (z_1 - z_2)^2} N \right] d\varphi dz_1 dz_2; \quad (1)$$

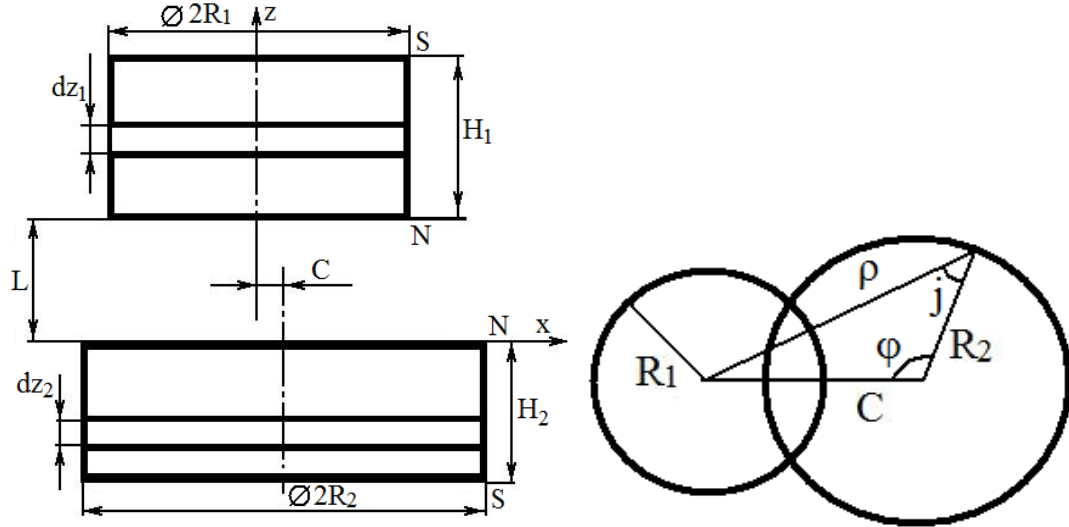
$$F_\rho = \frac{\mu_0 J_1 J_2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-H_2}^0 \int_L^{L+H_1} \frac{R_1 \cos \varphi}{[(R_2 + \rho)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{3/2}} \times \left[ E + \frac{R_2^2 - \rho^2 - (z_1 - z_2)^2}{(R_2 - \rho)^2 + (z_1 - z_2)^2} N \right] d\varphi dz_1 dz_2, \quad (2)$$

где  $E = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - a^2 \sin^2 \beta}}$  – полный эллиптический интеграл первого рода,  $J_1, J_2$  –

намагниченность магнитов,  $R_1, R_2$  – радиус магнитов,  $H_1, H_2$  – высота,  $L$  – зазор между магнитами,  $\varphi, z_1, z_2$  – параметры интегрирования,  $\rho$  – полярный радиус. Уравнения (1) и (2) приведем к безразмерному виду, разделив левую и правую части на  $R_1^2$ . Обозначив интегральную функцию символом  $\Psi$ , безразмерное уравнение можно записать в виде

$$\frac{2\pi F_{z,\rho}}{\mu_0 J_1 J_2 R_1^2} = \Psi \left( \frac{R_2}{R_1}, \frac{H_1}{R_1}, \frac{H_2}{R_1}, \frac{C}{R_1}, \frac{L}{R_1} \right).$$

Здесь безразмерные комплексы  $\frac{R_2}{R_1}$ ,  $\frac{H_1}{R_1}$ ,  $\frac{H_2}{R_1}$ ,  $\frac{C}{R_1}$ ,  $\frac{L}{R_1}$  являются тривиальными геометрическими критериями подобия (рис.)



#### Определение силы магнитостатического взаимодействия магнитов

Поскольку кольцевой магнит эквивалентен двум цилиндрическим, то для подшипников с такими магнитами геометрические критерии будут аналогичными. Нетривиальный критерий подобия имеет вид

$$B_0 = \frac{F_{z,\rho}}{J_1 J_2 R_1^2}. \quad (3)$$

Необходимое условие подобия магнитосиловых свойств подшипников с цилиндрическими магнитами сводится к равенству однотипных критериев подобия, то есть должна выполняться система критериальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{R_2}{R_1} = idem; \frac{C}{R_1} = idem; \\ \frac{H_1}{R_1} = idem; \frac{L}{R_1} = idem; \\ \frac{H_2}{R_1} = idem; \frac{F_z}{J_1 J_2 R_1^2} = idem. \end{cases} \quad (4)$$

Для выполнения достаточного условия подобия к приведенной системе (4) должны быть присоединены условия однозначности процесса. В данном случае эти условия сводятся к тому, чтобы, во-первых, магнитная проницаемость среды, окружающей магниты, незначительно отличалась от единицы и, во-вторых, магниты имели однородную и анизотропную намагниченность.

Пользуясь критериями подобия, легко определить силовые характеристики подшипника (звездочками не отмечаем параметры базового подшипника; переменная  $y \equiv C, z$ ):

$$F_{z,\rho}^* = B_0 J_1^* J_2^* R^{*2} = F_{z,\rho} \frac{J_1^* J_2^* R_1^{*2}}{J_1 J_2 R_1};$$

$$\frac{\partial F_{z,\rho}^*}{\partial y} = \frac{J_1^* J_2^* R_1^*}{J_1 J_2 R_1} \frac{\partial F_{z,\rho}}{\partial y}.$$

Если перейти от параметров  $R_1, R_1^*$  к объему  $V$  и  $V^*$  магнитов, то получим формулы:

$$F_{z,\rho}^* = \frac{J_1^* J_2^* V^{2/3}}{J_1 J_2 V^{2/3}} F_{z,\rho};$$

$$\frac{\partial F_{z,\rho}^*}{\partial y} = \frac{J_1^* J_2^* V^{1/3}}{J_1 J_2 V^{1/3}} \frac{\partial F_{z,\rho}}{\partial y}.$$

При рассмотрении подобия подшипников с конусообразными магнитами, кроме критериев, аналогичных по содержанию вышеприведенным, необходимо учитывать новый критерий  $\frac{H}{R-r} = \text{idem}$ , ( $r, R$  – радиусы меньшей и большей торцевой поверхности магнитов) характеризующий конусность магнитов.

Предложенные критерии подобия магнитопассивных подшипников позволяют проводить расчеты оптимальных магнитопассивных подшипников, зная только базовые значения радиальных и нормальных магнитных сил, а также геометрические критерии оптимальных по размерам магнитов. Полученные результаты могут использоваться и более широко для расчетов различных электромагнитных систем, выполненных с применением магнитов, например, из сплавов Sm–Co, Nd–Fe–B.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14–08–97500).

### Библиографический список

1. Cooper, R.K. Optimum Permanent Magnetic Dimensions for Repulsion Applications / R.K. Cooper, V.K. Neil, W.R. Woodruff // IEEE Trans. of Magn. 1973. V.9, № 2. P.125–127.
2. Альтман, А.Б. Постоянные магниты: Справочник / А.Б. Альтман, А.Н. Герберг, Н.А. Гладышев [ и др.] М.: Энергия, 1980. 488 с.
3. Болотов, А.Н. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. Тверь: ТвГТУ, 2013. 123 с.
4. Bolotov, A. N. Magneto-liquid sliding bearings / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, V. G. Pavlov // Friction and wear. 2004. V. 25. N 3. С. 286–291.
5. Болотов, А.Н. Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 10. С. 23–29.